

Painéis de Alvenaria Cerâmica com Juntas de Concreto Submetidos a Ensaio de Cisalhamento

OLIVEIRA, Juliana T.¹, LOURENÇO, Paulo B.¹ e BARROS, Joaquim A.¹

¹ Escola de Engenharia - Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil,
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
e-mail: juliana@civil.uminho.pt; pbl@civil.uminho.pt; barros@civil.uminho.pt



18th to 20th September 2002
Belo Horizonte, Brazil

RESUMO: *É notável que o mercado da construção civil encontra-se cada vez mais esclarecido e a concorrência acaba tornando-se um fator estimulante para a área de pesquisa de novas tecnologias. É nesse contexto que a alvenaria cerâmica está inserida, trazendo uma nova perspectiva sobre a sua utilização nas construções, uma vez que tem sido reconhecida como elemento de elevada capacidade estrutural.*

O trabalho apresentado neste documento, trata da apresentação e análise de resultados do comportamento de painéis de alvenaria de cerâmica furada, ligada por juntas de concreto, ensaiados ao cisalhamento, segundo a Norma Europeia EN1052-4.

Os ensaios presentes neste estudo fazem parte de um projeto no qual estão incluídos uma série de ensaios para a caracterização mecânica de materiais que serão utilizados, posteriormente, na confecção de coberturas em cascas de alvenaria armada.

Palavras Chave: Ensaio de Cisalhamento, Alvenaria Cerâmica, Juntas de Concreto.

1 INTRODUÇÃO

Apesar de vários estudos relativos a ensaios ao cisalhamento de alvenarias terem sido realizados, os fatores determinantes da ruptura ainda não estão totalmente compreendidos. Admite-se que as diferentes formas de ruptura dependem de vários fatores, dentre eles tem-se o nível de pré-compressão aplicada e o grau da aplicação de flexão.

O trabalho a seguir apresentado é baseado em resultados de ensaios com painéis constituídos por tijolos cerâmicos furados, ligados por juntas de concreto. A utilização do concreto nas juntas, deve-se ao fato de que o primeiro será utilizado, numa fase posterior da investigação, na confecção de coberturas em cascas de alvenaria armada.

Os ensaios triplos, realizados neste trabalho, são constituídos por painéis de alvenaria compostos por três fiadas de blocos, ligados por duas juntas verticais e duas juntas horizontais. A principal vantagem destes ensaios em relação aos ensaios duplos, que consistem em usar duas fiadas de alvenaria ligadas por uma única junta, está no fato do carregamento ser aplicado

de forma simétrica, pois a carga de cisalhamento é aplicada na fiada central.

Para se determinar os parâmetros que definem a Lei de Coulomb, o arranjo do teste deve minimizar o efeito da flexão, e o nível de tensão de pré-compressão não deve exceder 2N/mm^2 . Os níveis de carga de pré-compressão e o arranjo dos ensaios ao cisalhamento são especificados pela Norma Europeia 1052-4.

2 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

2.1 Caracterização dos Materiais

A campanha de ensaios engloba 14 testes com painéis de alvenaria, alguns dos quais são considerados preliminares, dado que tiveram como objetivo avaliar o desempenho do equipamento utilizado, motivo pelo qual não serão apresentados.

Os blocos cerâmicos utilizados para a confecção dos painéis apresentam dimensões de 210mm de comprimento, 100mm de largura e 65mm de altura, e furos de 25mm \times 25mm. O concreto é da classe C30/35, segundo Norma Europeia ENV206, com

abaixamento (Slump) de 16cm. A fluidez do concreto e o diâmetro máximo dos agregados britados são fatores bastante importantes para a trabalhabilidade deste concreto, dado que as juntas têm 25mm de espessura. O diâmetro do agregado também é importante, pois no modelo completo de cobertura em casca, serão colocadas armaduras transversais e longitudinais. As características dos materiais, em termos de resistência, são indicadas na Tabela 1. Os ensaios de resistência à compressão nos blocos foram realizados através do carregamento de compressão sobre as direções X e Y dos blocos, conforme ilustrado na Figura 1 (a).

Os painéis construídos possuem dimensões de 480mm de comprimento, 350mm de altura e 65mm, de espessura, conforme a Figura 1 (b).

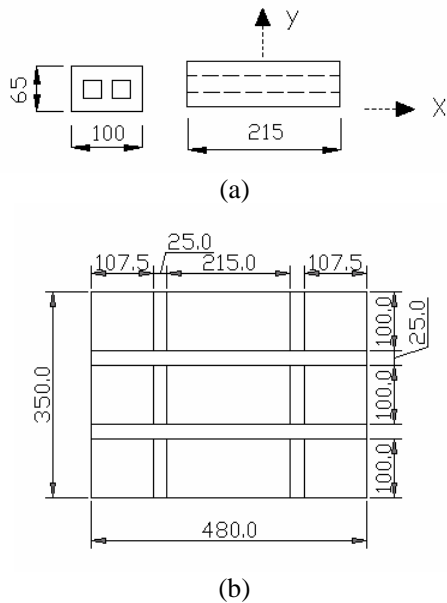


Figura 1. Modelo dos Painéis (dimensões em mm):
(a) Direção X e Y dos blocos; (b) Dimensões dos painéis para ensaio ao cisalhamento.

Tabela 1. Características dos Materiais.

Material		Resistência à compressão (N/mm ²)	Resistência à tração (N/mm ²)
Concreto		30,0	1,7
Bloco Cerâmico	Direção		
	Y	50,0	2,86
	Direção		
	X	100,0	4,32

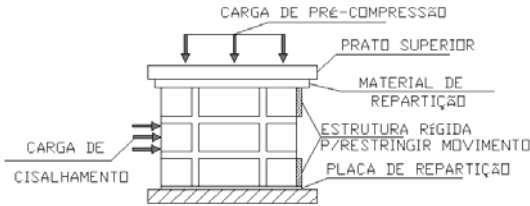
O resultado de resistência à tração do concreto, apresentado na Tabela 1, foi obtido pela média dos

resultados de ensaios realizados com 3 vigas de concreto, com entalhe no comprimento médio, de acordo com a RILEM FMC1 (1994) – norma para a determinação da Energia de Fratura de argamassa e concreto, através de ensaios à flexão de vigas sob três pontos de carga. A resistência à compressão do concreto foi obtida através da média dos resultados dos ensaios de compressão em 3 corpos de prova cilíndricos, conforme recomendações da RILEM CPC4 (1994). O valor de resistência à tração dos blocos cerâmicos foram retirados do trabalho realizado por Almeida (2002), que realizou uma campanha de ensaios de tração para os blocos cerâmicos utilizados neste trabalho. A caracterização da resistência à compressão dos blocos foi efetuada por intermédio de ensaios sobre 8 corpos de prova solicitados à carga segundo a direção X, e sobre 8 corpos de prova submetidos à carga segundo Y. As faces de aplicação da carga foram regularizadas por desgaste, conforme Norma Europeia EN 772-1.

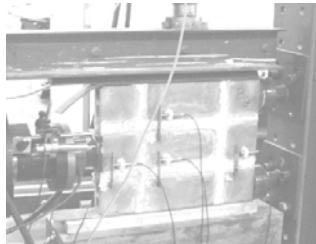
2.2 Sistema de ensaio

Além da aplicação da carga de cisalhamento, foram aplicadas aos corpos de prova, três níveis diferentes de carga de pré-compressão, e para cada valor de carga de pré-compressão, ensaiaram-se 3 painéis, constituindo um total de 9 ensaios. Os níveis de cargas de pré-compressão aplicados introduziram tensões próximas de 0,2N/mm², 0,6N/mm² e 1,0N/mm². A carga de cisalhamento foi aplicada com um incremento de 15 kN por minuto. É importante salientar que a carga de pré-compressão foi aplicada antes do início da aplicação da carga de cisalhamento, e se manteve constante durante a realização de cada ensaio.

Os painéis foram divididos em 3 séries: Série 1- Painéis submetidos a pré-compressão de 0,2N/mm² (painéis de B1 a B3); Série 2- Painéis submetidos a pré-compressão de 0,6N/mm² (painéis de B4 a B6); Série 3- Painéis submetidos a pré-compressão de 1,0N/mm² (painéis de B7 a B9). A Figura 2 mostra o arranjo dos ensaios e o sistema de aplicação das cargas.



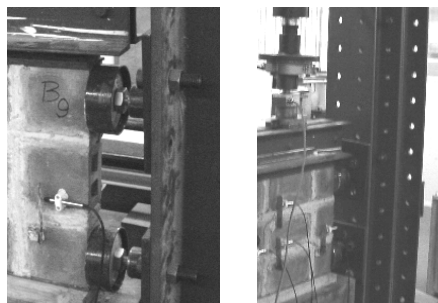
(a)



(b)

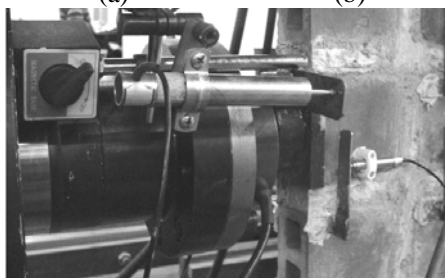
Figura 2. Sistema de ensaio: (a) Arranjo geral dos ensaios; (b) Sistema de aplicação de cargas.

Para restringir o movimento das fiadas inferior e superior e minimizar o efeito de flexão do painel, foram colocados dois apoios com dimensões suficientes para cobrirem toda a altura dos blocos destas fiadas, conforme ilustra a Figura 3 (a). Os atuadores de carga horizontal e vertical estão ilustrados nas Figuras 3 (b) e 3 (c).



(a)

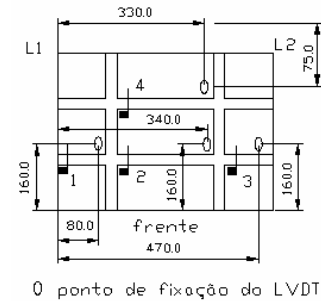
(b)



(c)

Figura 3. Sistema de ensaio: (a) Apoios utilizados para restringir o movimento horizontal; (b) Atuador de carga de pré-compressão; (c) Atuador de carga que introduz cisalhamento, e LVDT de controle de deslocamento.

Na instrumentação dos painéis, foram utilizados 8 transdutores de deslocamentos (LVDT's). Foram colocados 4 LVDT's para medição dos deslocamentos na direção do cisalhamento, e 3 LVDT's para a medição dos deslocamentos verticais. Ao atuador de carga horizontal, foi acoplado o LVDT, responsável pelo controle dos ensaios. As posições dos LVDT's podem ser vistas nas Figuras 4 e 5.



0 ponto de fixação do LVDT

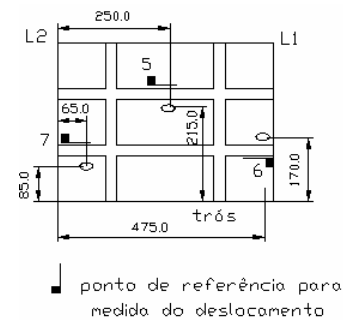
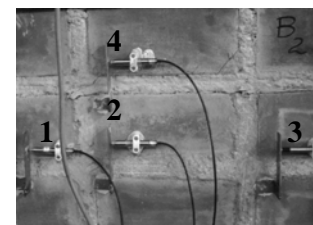
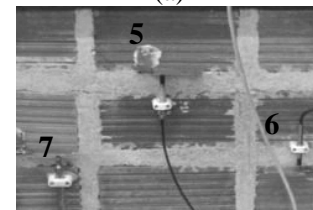


Figura 4. Posição dos LVDT's nos painéis, com dimensões em mm.



(a)



(b)

Figura 5. Instrumentação dos painéis ensaiados: (a) Posição dos LVDT's (1,2,3 e 4) para medição de deslocamentos horizontais, na frente dos painéis; (b) Posição dos LVDT's (5,6 e 7) para medição de deslocamentos normais, na face posterior dos painéis.

3 RESULTADOS

3.1 Painéis Individuais

O LVDT 1 mediu o deslocamento horizontal entre o bloco, onde estava sendo aplicada a carga de cisalhamento, e o bloco da fiada inferior. A Figura 6 representa a relação entre a carga de cisalhamento e o deslocamento registrado no LVDT 1, para os ensaios da série 1.

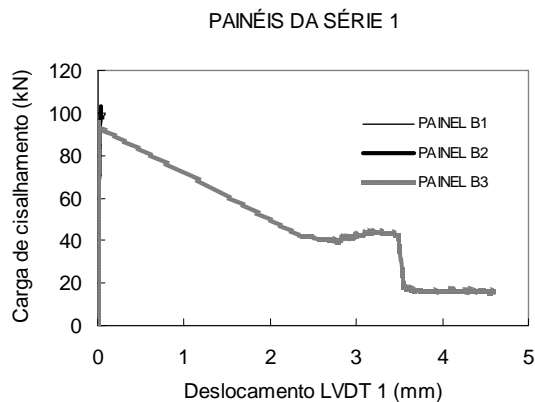


Figura 6. Relação entre a carga de cisalhamento e o deslocamento no LVDT 1, para os painéis da série 1.

Da análise da Figura 6, verifica-se que os painéis B1 e B2 tiveram pequenos deslocamentos até a carga de ruptura das interfaces, porém não foi possível registrar o amolecimento destes painéis. Para a carga de ruptura do painel B1, o LVDT 1 registrou um deslocamento de apenas 0,08mm, e para o painel B2, esse deslocamento foi de 0,03mm. Para o painel B3, o LVDT 1 registrou um deslocamento de 0,02mm, no momento da ruptura das interfaces. No entanto, para o ensaio realizado com este painel, o sistema de aquisição de dados registrou o comportamento após a ruptura da primeira interface, na junta inferior. No processo de degradação da resistência do painel, observa-se um aumento súbito da resistência (para um deslocamento de 2,5mm). Suspeita-se que a distribuição do agregado britado tenha contribuído consideravelmente para a existência de atrito na junta rompida, dado que, a face de contato do bloco com o concreto é lisa. Notou-se que a interseção das juntas de concreto influenciou bastante a direção da linha de ruptura nos painéis. Nesta região, a localização do agregado britado é muito importante, pois ao encontrar resistência ao cisalhamento, mediante a presença do agregado, a linha de ruptura desvia-se. Percebeu-se, também, que o agregado, na região de interseção das juntas, pode representar uma rótula, dado que, provoca uma pequena flexão no conjunto do painel que se encontra em movimento, o que conduz a formação de fissura no bloco, como está ilustrado na Figura 7 (a) e 7 (b).

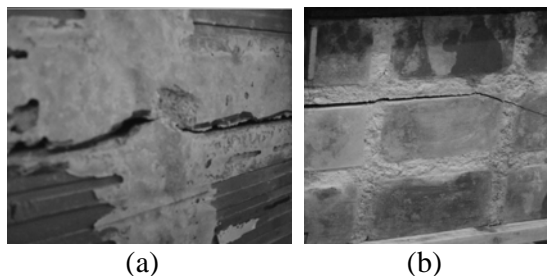


Figura 7. Influência do agregado britado na ruptura dos painéis: (a) Fissura na face rugosa do painel; (b) Efeito da Fissura na ruptura de um bloco.

Verifica-se que os painéis da série 1 obtiveram uma pequena variabilidade em termos de resistência ao cisalhamento, com valor médio de $1,60\text{N/mm}^2$. Na Figura 8, pode-se ver que a ruptura da interface bloco da fiada média/concreto, na junta inferior, seguiu a direção horizontal, e ao interceptar a segunda junta vertical, rompeu-se na direção diagonal. Esse tipo de ruptura ocorreu em todos os ensaios da série 1. Dessa forma, a fissura teve continuidade na interface inferior, entre os blocos da fiada inferior e o concreto. A direção desta ruptura deve-se, provavelmente, à presença dos apoios horizontais, nas fiadas superior e inferior, que provocam a concentração de tensões de compressão nestas extremidades, associada às tensões tangenciais existentes na região da base do painel e às tensões de cisalhamento e de compressão normal. A combinação destes esforços conduz à formação de um bloco de tensões de cisalhamento, principalmente nos blocos da fiada inferior, próximos ao apoio horizontal.

Em alguns ensaios verifica-se a ocorrência de fissuras nos blocos, como foi o caso do ensaio 2, em que a linha de ruptura na interseção das juntas dirigiu-se em diagonal através do bloco, possivelmente porque a região do bloco onde houve a propagação da fissura era uma região menos resistente, ou apresentava fissuras iniciais que induziram o ocorrido. A existência de agregado britado na zona de interseção, também impede a continuação da propagação da fissura pela interface.

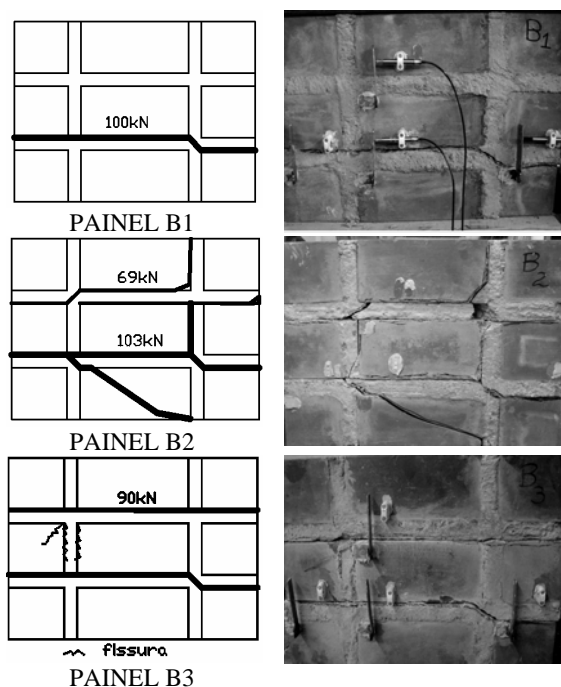


Figura 8. Mapeamento das fissuras dos painéis da série 1.

Tendo por base de comparação os resultados obtidos na série 1, houve um aumento significativo da carga de cisalhamento nos painéis da série 2. A média da carga de cisalhamento, que era de aproximadamente 100 kN para os ensaios da série 1, passou a ser de aproximadamente 120 kN, como pode ser visto na Figura 9.

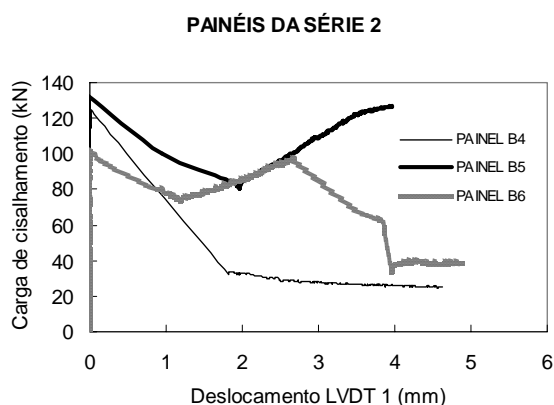


Figura 9. Relação entre a carga de cisalhamento e o deslocamento no LVDT1 para os painéis da série 2.

O gráfico apresentado na Figura 9, mostra que a ruptura do painel B4 ocorreu simultaneamente nas interfaces das duas juntas, sob carga de 118 kN. Na curva deste painel, percebe-se a ocorrência de um pequeno atrito residual. Nos painéis B5 e B6, ocorreu a ruptura de uma das juntas dos painéis, através da interface. No entanto, após uma fase de

amolecimento, a carga de cisalhamento voltou a aumentar até a ocorrência da ruptura da interface da outra junta, com mesmo valor de carga responsável pela ruptura da primeira interface. No painel B6, mesmo após a ruptura da segunda interface, verifica-se que para um deslocamento de aproximadamente 4mm, desenvolve-se algum atrito nas juntas. O mapeamento das fissuras dos painéis da série 2 pode ser visto na Figura 10

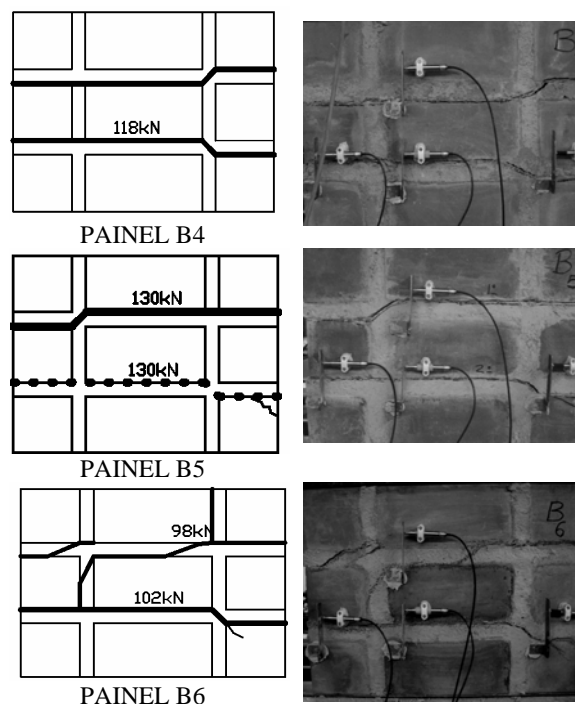


Figura 10. Mapeamento das fissuras dos painéis da série 2.

Os deslocamentos dos painéis da série 3 foram menores que os deslocamentos obtidos nos painéis da série 2 e 1, provavelmente devido ao fato da carga de pré-compressão aplicada aos painéis da série 3 ser 40% e 80% maior do que a carga aplicada nos painéis da série 2 e 1, respectivamente. A carga de cisalhamento média para os painéis B7, B8 e B9, foi de 150 kN, no entanto, o comportamento dos painéis foi bem diversificado como pode ser visto nas Figuras 11 e 12.

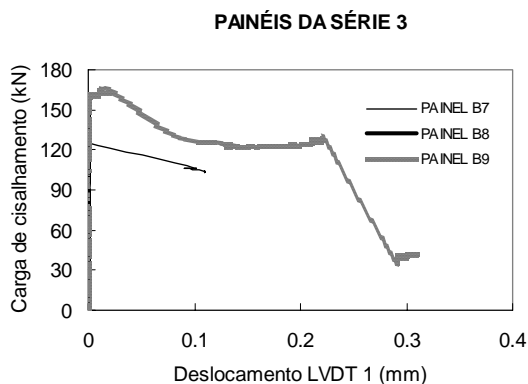


Figura 11. Relação entre a carga de cisalhamento e o deslocamento no LVDT1 para os painéis da série 3.

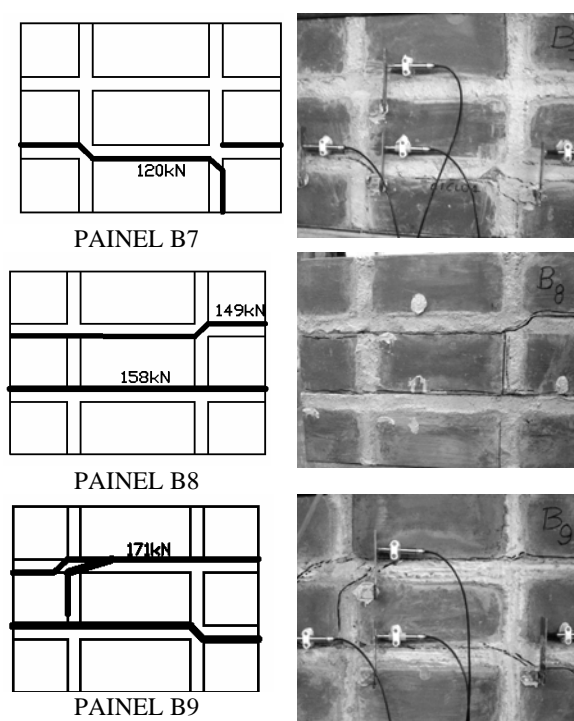


Figura 12. Mapeamento das fissuras dos painéis da série 3.

3.2 Apreciação do Conjunto dos Resultados

Nota-se que em muitos ensaios houve o cisalhamento da interface bloco-concreto, acompanhado por fenda diagonal no bloco. Este fato foi observado em ensaios da série 1, como em ensaios das outras séries, o que geralmente ocorre, no caso de alvenaria convencional, quando se tem elevados níveis de pré-compressão, ver Lourenço (1996). No entanto essas fissuras ocorreram em regiões próximas aos apoios, podendo ser explicadas devido à concentração de tensões nessa região.

O aumento da carga de pré-compressão alterou significativamente a resistência do painel ao

cisalhamento, como já era esperado, conforme pode ser visto na Tabela 2. O aumento de resistência ao cisalhamento foi de 21,9% para os painéis da série 2 em comparação aos painéis da série 1, e de 22,5% para os painéis da série 3 em relação aos da série 2.

Tabela 2. Resistência ao cisalhamento dos painéis.

Série	Painel	Tensão de Cisalhamento (N/mm ²)	Tensão de Cisalhamento Média (N/mm ²)
Série 1	B1	1,60	1,60
	B2	1,65	
	B3	1,55	
Série 2	B4	2,06	1,95
	B5	2,17	
	B6	1,63	
Série 3	B7	1,92	2,39
	B8	2,53	
	B9	2,72	

O comportamento da junta de ligação entre duas ou mais unidades, quando se aplicam esforços de cisalhamento com pré-compressões não muito elevadas, pode ser associado a Lei de Coulomb, ver Jukes e Riddington (2000), que traduz uma relação linear entre a tensão de cisalhamento (τ) e a tensão de compressão (σ) dada pela Equação (1):

$$\tau = c + \tan\phi\sigma \quad (1)$$

onde c é a coesão e ϕ é o ângulo de atrito. Na Figura 13, a reta apresentada corresponde à regressão linear, realizada sobre a média das resistências alcançadas em cada série de ensaios. Os valores das resistências ao cisalhamento, obtidas em cada um dos painéis ensaiados, também são ilustrados no gráfico da Figura 13.

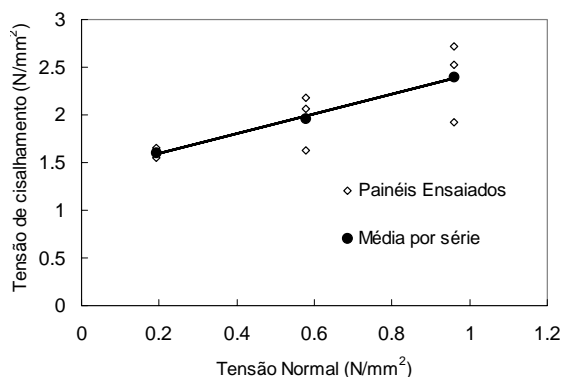


Figura 13. Resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito na junta.

O coeficiente de correlação da reta é de 0,997, resultando numa coesão de 1,39 e numa tangente do ângulo de atrito de 1,03. Em alvenarias

convencionais, o valor habitual da tangente do ângulo de atrito é de 0,7 a 1,2 para diferentes combinações entre blocos e argamassas, segundo Van Der Pluijm (1999). No caso dos ensaios apresentados neste trabalho, $\tan\phi$ é igual a 1,03, o que representa um valor corrente.

De acordo com a Norma Europeia EN1052-4 (2000), o valor característico para a resistência ao cisalhamento é de $0,8fv_0$, sendo que fv_0 é o valor da resistência inicial ao cisalhamento, obtido a cada ensaio.

3.3 Dilatância dos Painéis

Nas Figuras de 14 à 16 estão ilustrados os gráficos contendo os deslocamentos médios horizontais \times deslocamentos médios verticais para cada painel. Os deslocamentos foram calculados fazendo-se a média dos deslocamentos dos LVDT's 1, 3 e 4 (média horizontal) e LVDT's 5, 6 e 7 (média vertical).

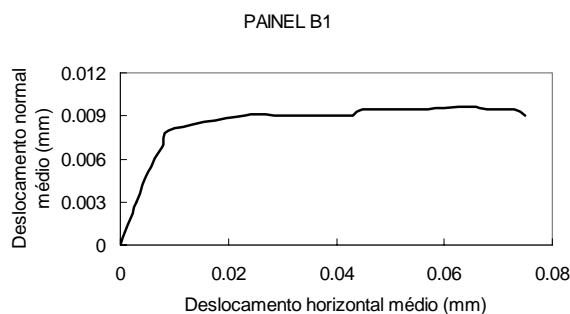


Figura 14. Gráfico da Média dos deslocamentos no sentido do cisalhamento \times deslocamentos no sentido normal do painel B1.

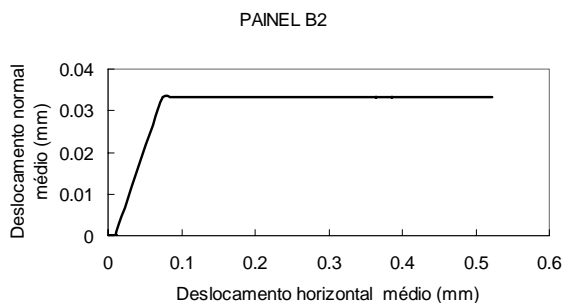


Figura 15. Gráfico da Média dos deslocamentos no sentido do cisalhamento \times deslocamentos no sentido normal do painel B2.

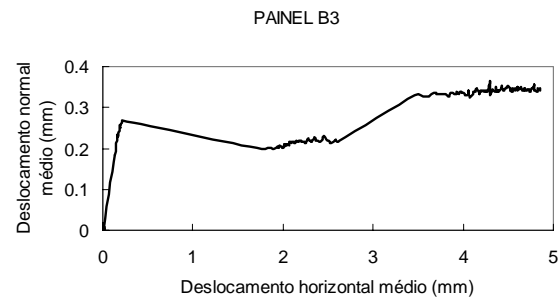


Figura 16. Gráfico da Média dos deslocamentos no sentido do cisalhamento \times deslocamentos no sentido normal do painel B3.

As Figuras 14 e 15 mostram que os painéis B1 e B2 tiveram um comportamento próximo ao comportamento da alvenaria convencional. Com dilatação praticamente nula após ocorrência das fissuras. A primeira queda observada na Figura 16 deve estar associada à deficiente compactação do concreto das juntas. Esta fase termina com a ruptura da junta, ocorrendo, em seguida, uma fase de dilatação até um deslocamento de aproximadamente 3,5mm.

CONCLUSÕES

Os níveis de carga de pré-compressão interferem significativamente nos resultados de resistência ao cisalhamento das alvenarias. Assim, nos painéis da série 2, a resistência média foi de 21,9% superior à registrada nos painéis da série 1, e de 22,5% para os painéis da série 3, em relação aos painéis da série 2. Considerando a diferença de resistência entre os painéis da série 3 com os painéis da série 1, esse aumento foi de 49,4%.

Sabe-se que um dos aspectos importantes na determinação da resposta ao cisalhamento nas juntas de alvenaria é a capacidade de gerar um estado de tensão uniforme nas juntas, no entanto isto é difícil de se conseguir, devido à introdução de tensões normais não uniformes nas juntas. No caso de juntas de concreto, o efeito da flexão pode ser mais significativo, uma vez que a dimensão dos agregados é muito importante face à espessura da junta.

O atrito residual verificado em alguns dos gráficos de carga \times deslocamento, deve-se ao fato da superfície de ruptura do concreto, na junta, ser irregular, já que o bloco, na região de contato com o concreto, tem a face lisa.

Os apoios utilizados nas fiadas superior e inferior condicionaram a formação de fendas diagonais na interseção das juntas horizontais com a junta vertical

próxima às apoios, devido à concentração de tensões de compressão nesta região.

A combinação dos esforços de compressão, na região do apoios horizontais, com as tensões tangenciais, na região da base do painel, somados com a pré-compressão aplicada e com a carga de cisalhamento, geram blocos de tensões de cisalhamento em alguns blocos, provocando a ruptura destes blocos.

Observou-se que, a ruptura através das interfaces ocorreu com frequência nos ensaios, devido à baixa aderência do bloco e do concreto, quando submetidos a tração, provocada por esforços de flexão.

O estudo detalhado do comportamento do painel de alvenaria ao cisalhamento é bastante complexo, uma vez que envolve muitos parâmetros de estudo. No entanto, de forma geral, os ensaios forneceram bons resultados em termos de cargas de ruptura e configuração das fissuras.

A tangente do ângulo de atrito dos painéis ensaiados foi de 1,03, que está dentro do intervalo de valores encontrados em alvenarias convencionais, que varia de 0,7 a 1,2, segundo Van Der Pluijm (1999). A coesão é de 1.39 N/mm^2 , o que representa um valor médio a elevado.

Nas alvenarias convencionais, é comum a confecção dos painéis com juntas intercaladas. É importante salientar que os painéis de alvenaria tratados neste estudo possuem juntas verticais contínuas, pois serão utilizados, numa fase posterior da investigação, na confecção de coberturas em cascas de alvenaria armada. Parece verificar-se que as juntas verticais contínuas não possuem influência significativas em termos de coesão e de ângulo de atrito, tendo-se obtido valores adequados para estas propriedades.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado parcialmente pelo projeto GROWTH GROW – 1999 – 70420 “ISO BRICK”, da Comunidade Européia. O primeiro autor agradece ainda o financiamento pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através da bolsa BD/7106/2001.

REFERÊNCIAS

- J.C. Almeida, P.B. Lourenço and J.A. Barros. Characterization of brick and brick–mortar interface under uniaxial tension. VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries. 2002.
- P. Jukes and J. R. Riddington. The Failure of Brick Triplet Test Specimens, Masonry International. Vol 15, n^o 1, 2001.
- EN 1052-4, Norma Européia para Métodos de Ensaio em Alvenaria – Parte 4: Determinação da Resistência ao Cisalhamento. Maio, 2000.
- EN 772-1, Norma Européia para Métodos de Ensaio de Blocos para Alvenaria – Parte 1: Determinação da Resistência à Compressão. Junho, 2000.
- V.D. Pluijm. Out of Plane Bending of Masonry Behaviour and Strenght. Eindnove University of Technology. Outubro, 1999.
- P.B. Lourenço. Computational Strategies for Masonry Structures. Delft University of Technology. Fevereiro, 1996.
- RILEM. Technical Recommendations for the Testing and use of Construction Materials. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. 1994.